

## 소형 독립형 풍력발전기의 진동 모니터링 및 분석

김 석현<sup>1)</sup>, 유 능수<sup>2)</sup>, 남 윤수<sup>3)</sup>, 이 정원<sup>4)</sup>

### Vibration Monitoring and Analysis of a Small Stand Alone Wind Turbine Generator

S.H.Kim, N.S.Yoo, Y.S.Nam, J.W.Lee

Key words : Small Stand Alone Wind Turbine Generator(소형 독립형 풍력발전기), Remote Monitoring System(원격 모니터링 시스템), Tower-Cable Resonance(타워- 케이블 공진), Power Performance Curve (출력 성능 곡선)

Abstract : A vibration monitoring system for a small size wind turbine (W/T) is established and operated. The monitoring system consists of monolithic integrated chip accelerometer for vibration monitoring, anemometers for wind data acquisition and auxiliary sensors for atmospheric data. Using the monitoring system, vibration response of a 6kW stand alone W/T generator is investigated. Acceleration data of the W/T tower under various operation condition is acquired in real time using LabVIEW and the data are remotely transferred from the test site to the laboratory in school by internet. Vibration response characteristics of the tower structure are diagnosed in the aspect of stability of W/T. Wind data and electrical power performance are also investigated with the stability problem.

#### 1. 서 론

화석 연료의 사용 증가에 따른 환경 문제와 최근의 고유가 문제는 태양광, 태양열, 풍력, 연료전지, 수소, 바이오메스, 조력 등 다양한 신재생에너지의 개발에 국가적 관심을 고조시키고 있다. 특히, 태백준령 중심의 산간지방, 해안 및 섬 지역의 풍력자원에 대한 조사가 진행되고 풍력발전의 가능성이 확인됨에 따라 청정 대체 에너지원으로서의 풍력발전에 대한 투자 및 연구가 활발히 이루어지고 있다. 서구의 경우, 독일을 선두로 미국, 스페인, 덴마크 등이 풍력 발전 산업을 주도하면서, 1996년 이후 세계 풍력 시장의 연평균 성장률은 40%에 달하고 있다.<sup>(1)</sup> 선진국에 비하여 국내 풍력 시장은 그 규모면에서 아직 미미한 수준이나, 신재생에너지의 확대 보급에 대한 정부의 의지가 확고하고, 업체, 대학 및 연구기관이 참여하는 공동 연구가 추진되고 있다. 2005년 48MW 규모의 영덕 풍력발전 단지가 준공되어 가동 중이며,<sup>(2)</sup> 750kW급의 국내 개발이 거의 완료되었고, 2MW급 풍력 발전기가 개발 중이

다. 이와 함께 산간 오지나 섬 등에서 독립형으로 사용 가능한 6kW, 10kW급 독립형 소형 풍력발전기에 대한 연구 개발도 진행 중이다. 국산화 개발 또는 수입되는 풍력발전기를 상업용 단지에 적용하기 위해서는 국내의 풍황 조건하에서 제 성능을 발휘하는지에 대한 실증이 반드시 선행되어야 한다.<sup>(3)</sup> 그러나 최근에는 풍력발전기의 국산화 개발이 진행된 관계로, 발전 성능이나 구조 안전성 및 전력품질 등에 대한 체계적인 실증 기술은 이제 시작 단계이다. 이에 관련하여 최근, 강원도 평창 지역에 '대관령 풍력실증연구단지'가 조성되어 풍력발전기의 성능을 종합적으로 실증할 수 있는 시스템을 운영하고 있다.<sup>(4)</sup> 본 연구에서는 실증연구단지내에 구축된 통합 모

1) 강원대 기계메카트로닉스공학부  
E-mail : seock@kangwon.ac.kr  
Tel : (033)250-6372 Fax : (033)257-4190  
2) 4) 강원대 기계메카트로닉스공학부  
E-mail :  
yooneso@kangwon.ac.kr, nys@kangwon.ac.kr,  
jwlee@kangwon.ac.kr

니터링 시스템을 소개하고, 진동 모니터링과 분석을 통하여 소형 독립형 풍력발전기의 구조 안전성 문제를 검토한다. 풍력발전기의 구조 진동 문제는 설계 단계에서 반드시 고려하여야 하는 중요한 현안이나<sup>(5)</sup>, 현재까지 국내의 연구 수준은 매우 미약한 실정이다.<sup>(6,7)</sup>

## 2. 풍력발전기의 제원

시험 모델로 독일 INVENTUS사의 INVENTUS 6 Stand-Alone -Version을 선정하였다. Fig.1은 연구용 풍력발전기이며 Table 1은 그 제원이다. 타워 구조는 Fig. 1에서와 같이 4개의 2단 가이 케이블(guy cables)로 지지된다. 또한, 날개의 진동을 억제하는 4개의 막대로 구성된 날개댐퍼는 상단에서 타워를 횡 방향으로 가진한다. 구조용 강관으로 제작된 타워는 기초부에서 핀으로 체결되어, 핀 축에 대하여 회전이 자유로운 구조이다. 윈치를 사용하여 케이블을 감아줌으로써, 한 사람만으로도 발전기를 설치하는 것이 가능하다.

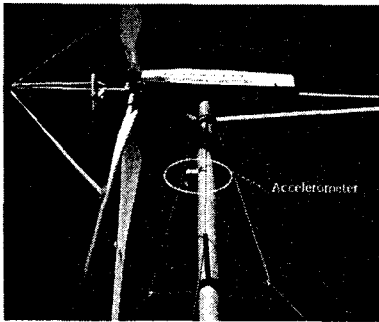


Fig. 1 6kW W/T test model.

Table 1. Specification of 6kW W/T

| model                | INVENTUS 6  |
|----------------------|---|
| rated power          | 6kW   |
| hub height           | 13 m  |
| rotor diameter       | 6 m   |
| number of blades     | 4   |
| operation speed      | 80-145 rpm  |
| rated wind speed     | 10.5 m/s  |
| cut-in wind speed    | 3 m/s   |
| cut-out wind speed   | 30 m/s  |
| survival wind speed  | 60 m/s  |
| power control system | passive blade pitch change, pole change                         |
| yawing control       | wind vane   |
| weights              | rotor blades : 48kg<br>machine nacelle : 208kg<br>tower : 220kg |

## 3. 진동 모니터링

### 3.1 모니터링 시스템의 구성

장기간 풍력발전기의 각종 성능 데이터를 취득하기 위하여, 대관령 풍력실증연구단지내에 실시간 종합 모니터링 시스템이 구축되었다.<sup>(4)</sup> 발전기의 진동 상태를 진단하기 위해서는 진동 신호뿐만 아니라 풍속, 풍향, 압력, 온도 및 회전속도를 함께 모니터링 하는 것이 요구된다. 따라서 진동 모니터링 시스템은 진동센서 및 풍향 센서를 연구단지의 원격 모니터링 시스템에 연결하여 구성된다. Fig. 2는 모니터링 시스템의 구성도이다. 모니터링 시스템의 기본 제어장치는 NI(national instruments)사의 산업용 PC NI-8176이다. 이 내장형 제어기에 두 개의 이미지 처리 보드와 두 개의 다기능 입출력(MIO: multifunction input output) 보드 PXI6040E가 PXI 슬롯으로 결합되어 있다. 풍속계 출력 신호들은 PXI6040E 보드를 통하여 5kHz로, 나머지 신호들은 1 Hz로 샘플링 되어 PC(NI-8176)로 입력된다. 전술한 풍향계, 압력계, 온도계, 가속도계 출력은 32채널 아날로그 입력보드인 SCXI 1102B를 통하여 내장형 제어기인 PC로 입력된다. 한편, LabVIEW를 이용하여 하드 디스크에 수록된 계측 데이터 파일은 인터넷으로 원격 전송되어 중앙 컴퓨터에서 MATLAB을 이용하여 성능해석, 또는 상태 진단 등에 사용된다.

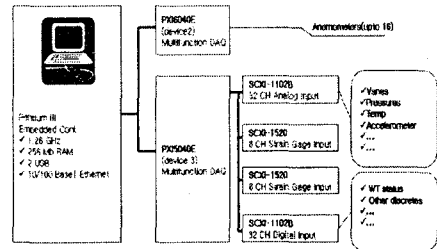


Fig. 2 Block diagram of the acceleration and wind condition measurement.

### 3.2 진동의 측정

진동은 IC형 가속도계(ADXL105, Analog Devices)로 Fig. 3과 같이 타워 상 11.7m 높에서 측정한다. 타워의 횡 진동 크기를 산정하기 위해서 Fig. 3의 X,Y 두 방향 가속도를 측정하였다. 20Hz의 샘플링 주파수로 가속도 신호를 취득하였고, 매 100초 구간의 신호에 대하여 Matlab을 사용하여 푸리에 변환(Fourier transform)시켰다. 풍속과 풍향은 1Hz로 샘플링 하여 매 100초 구간

의 평균치를 취하였다. 풍속계(NRG 40)는 풍속에 비례하는 주파수를 출력시키고, 이는 LabVIEW 내에서 풍속으로 변환된다. 측정 위치는 타워 남쪽 11m에 풍황계측타워 13m 높이의 풍속을 측정하였다. 회전 속도는 광센서(한영전자, PG-TR, GR 6210-2)로 브레이크 디스크 1회전 당 4개의 펄스를 매초 측정 한 후, LabVIEW내에서 로타 회전과 브레이크 디스크의 회전 비율(1: 10.1)을 고려하여 결정하였다.

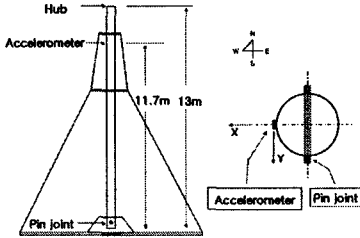


Fig. 3 Acceleration measurement set up.

#### 4. 모니터링 결과

Fig. 4는 X,Y 방향의 가속도 스펙트럼을 회전 속도별로 그린 결과이다. 1.2Hz ~ 1.3Hz 부근에서 지배적인 피크 성분이 관찰된다. Fig.3에서 보듯이 타워는 핀 축 주위로 회전이 가능하므로 X축 방향으로 더 큰 진동이 발생하고 있다. 147rpm에 접근하면서 진동레벨은 급격히 증가한다. 특히 1차 피크는 147rpm부근에서 매우 크게 발생되는데, Fig.5의 주파수 분석결과로부터 1.22Hz의 주파수 성분이 응답을 지배하는 것을 볼 수 있다. 이는 147rpm 회전주파수의 1/2 성분이며, 타워계의 1차 고유진동수에 근접하는 것으로 확인되었다. 회전수나 그 조화성분이 가진력으로 작용하는 것이 보통이나, 회전수의 1/2성분이 구조계를 공진시키는 것이 흥미롭다. 이는 모델이 가지고 있는 회전축과 날개 댐퍼의 연성기구에 기인하는 것으로 보이며, 그 규명을 위해서는 날개 댐퍼 기구에 대한 동역학적 검토가 필요할 것이다. Fig.6은 풍속-회전속도 관계를 보인다. 데이터 한 개(\*표시점)는 100초 동안의 평균 풍속과 회전 속도를 의미한다. 정격 풍속 10m/s 이후 140rpm ~ 150rpm의 속도로 작업한다. 풍속 16m/s에 이르면 작업속도가 147rpm 정도로 되고 이 부근에서는 구조계의 공진으로 진동이 매우 높게 나온다. 댐퍼를 사용하여 날개의 심한 진동은 억제되나, 타워 상단의 발전기는 심한 진동에 놓인다. Fig. 6에서 발전기는 150rpm 이상에서 작업할 가능성은 낮다. 따라서 가이 케이블의 장력을 높여 타워계의 고유진동수를 1.25Hz 이상으

로 올린다면 공진대역은 150rpm 이상으로 높아져 안전성에 도움이 될 것이다.

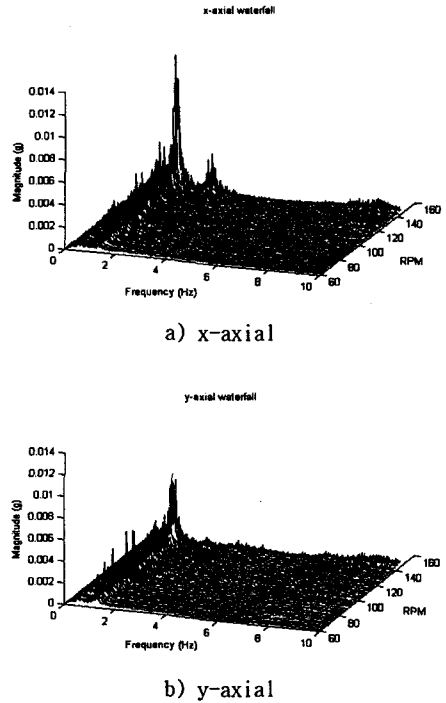


Fig. 4 Water fall plot of W/T vibration.

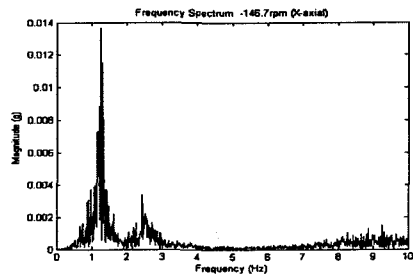


Fig. 5 Frequency spectrum at 146.7rpm.

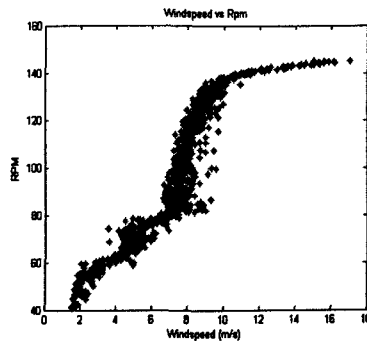


Fig. 6 Wind speed and rotor speed.

## 5. 출력 성능 평가

출력곡선과 연간 발전량을 평가하기 위하여 2004년 6월부터 2005년 1월까지의 데이터를 사용한다. Fig. 7은 출력곡선과 INVENTUS에서 제공된 출력곡선을 비교한다. 측정결과는 INVENTUS 출력곡선과 비교할 때 정격출력이 약 0.6kw-0.7kw 정도 작게 나온다.

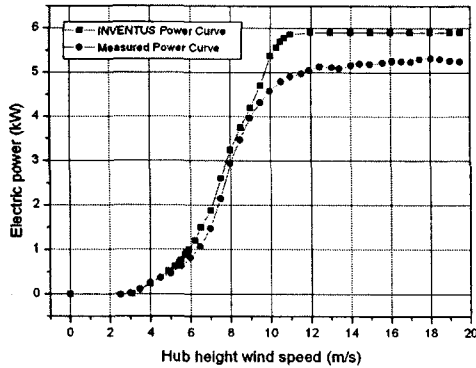


Fig. 7 Measured power curve v.s. INVENTUS power curve.

## 6. 결론

대관령 풍력실증연구단지에서의 모니터링 시스템을 사용하여 6kW급 독립형 풍력발전기(INVENTUS 6)의 진동과 출력 성능을 모니터링 한 결과 다음의 결론을 얻었다.

- 1) 본 연구 모델은 147rpm 부근에서 작업 시, 로타 회전수의 1/2 주파수 성분에 의하여 타워 구조계의 1차 고유진동수(1.22Hz)가 공진되어 최대의 진동레벨을 보였다.
- 2) 정격 출력은 풍속 10m/s 이상에서 나오며, 제 작업체에서 제시하는 값보다는 0.6kw-0.7kw 낮게 나왔다.
- 3) 140rpm ~ 150rpm 에서 큰 공진이 발생하는데, 이 범위는 정격 속도 범위에 가깝다. 케이בל 장력을 높여 고유진동수를 1.25Hz 이상으로 올리면 공진 대역을 작업 범위 위로 높일 수 있을 것이다.

## 후 기

본 연구는 산자부의 예산 지원으로 수행된 '6kW 소형 풍력발전기 실증연구' 사업의 일환이며, 에너지관리공단의 지원에 감사드린다.

## References

- [1] Wind Force 12, European Wind Energy Association and Green Peace.
- [2] <http://www.unison.co.kr>
- [3] 유능수의, 2004, "750kW급 풍력발전기실증 연구" 산업자원부연구보고서 2001-N-WD11-P - 11.
- [4] 남윤수, 김형기, 유능수, 이정완, 2003, "LabVIEW를 이용한 풍력발전기 모니터링 시스템 개발", 한국정밀공학회 논문집 제 20권 5호, pp. 92-97.
- [5] E.Hau, 2000, Wind Turbines, Springer Verlag.
- [6] S.H.Kim, Y.S.Nam, N.S.Yoo, 2004, "Vibration Analysis of the Tower Structure of a Wind Turbine Generator", Proceedings of the 3rd World Wind Energy Conference, WWEA.
- [7] 김석현, 남윤수, 은성용, 2005, "750kW 풍력발전기 타워 구조의 진동 특성", 한국소음진동공학회 논문집 제15권 2호.